

我国西南干旱研究最新进展综述

尹 晗^{1,2}, 李耀辉^{1,2}

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:随着全球气候变化, 重大干旱等极端气候事件有增加趋势。我国历来是受干旱危害最严重的国家之一, 近年来干旱强度和受旱区域不断增加, 而且开始由于旱半干旱区向湿润区发展。雨水充沛、气候湿润的西南地区, 近年来发生持续数年的严重干旱事件, 给当地社会经济造成重大损失, 并引起了广泛关注。许多学者也对西南干旱进行了分析研究, 他们通过分析西南地区降水和温度的时空分布特征, 以及影响西南干旱的大气环流和天气系统, 寻找造成西南干旱的发生规律、特征和形成机理; 还有学者运用干旱指数、卫星遥感等方法研究了西南干旱的监测技术。本文研读了近 10 a 来大量相关文献, 对西南干旱的最新研究成果进行了总结和评述, 力图为西南乃至其它区域干旱的研究提供借鉴, 为干旱防灾减灾提供帮助。

关键词:西南干旱; 研究进展; 综述

文章编号:1006-7639(2013)-01-0182-12 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-01-0182

中图分类号:P461

文献标识码:A

引 言

近年来, 随着全球气候的持续变暖, 极端天气气候事件的发生频率和强度都有增加趋势, 严重影响了人类的生存和社会经济的可持续发展, 引起了国内外学者的普遍关注, 成为研究全球变化的一项重要课题。其中, 干旱是众多极端气候事件中影响范围最大、给人类造成的损失最严重、被认为是世界上最严重的自然灾害类型之一。仅仅从自然的角度来看, 干旱和旱灾是 2 个不同的科学概念。干旱通常指淡水总量少, 不足以满足人的生存和经济发展的气候现象。干旱一般是长期的现象, 而旱灾却不同, 它只是属于偶发性的自然灾害, 甚至在通常水量丰富的地区也会因一时的气候异常而导致旱灾。干旱和旱灾从古至今都是人类面临的主要自然灾害。即使在科学技术如此发达的今天, 它们造成的灾难性后果仍然比比皆是。尤其值得注意的是, 随着经济发展和人口膨胀, 水资源短缺现象日趋严重, 这也直接导致了干旱地区的扩大与干旱化程度的加重, 干旱化趋势已成为全球关注的问题。

我国是干旱灾害频发的国家。近年来, 我国的干旱区域不断增大、有从干旱区向湿润区发展的趋势。我国西南地区本来是一个雨水充沛、气候湿润的地区, 但最近几年, 该地区屡屡发生严重的干旱灾害, 造成了难以估量的损失。近年来发生在西南地区的几次异常干旱灾害事件主要有 2005 年春季云南异常干旱, 2006 年夏季川渝地区特大干旱, 以及 2009 年秋至 2010 年春以云南、贵州为中心的 5 个省份的旱灾^[1], 特别是 2009~2012 年的干旱事件具有持续时间长、影响范围广、灾害程度重的特点, 是西南地区有气象记录以来最严重的气象干旱事件。因此, 研究西南地区干旱事件及其变化规律、特征和成因就显得尤为迫切, 也成为近年来相关研究的热点领域。

造成西南干旱的原因有很多, 也很复杂, 不同学科的学者给出的解释也不同。例如, 气象统计学的解释是旱灾是百年一遇的气候现象, 气象地理学的解释是青藏高原阻隔了印度洋较弱的水汽而形成干旱, 地球气象学的解释是地球排气和排热造成干旱, 地质学的解释是喀斯特地貌造成地表水渗漏而至

收稿日期: 2013-02-24; 改回日期: 2013-03-10

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项项目“多时间尺度干旱监测预警、评估技术报告”(GYHY201006023)资助

作者简介: 尹晗(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱气候变化相关研究。E-mail: yinhan271@163.com

通讯作者: 李耀辉。E-mail: li-yaohui@163.com

旱,生物学的解释则将旱灾归咎于被称为“抽水机物种”的速生物种桉树和橡胶树的大面积种植过度吸纳地下水和地表水而形成旱灾。一个地区发生持续的严重干旱,影响因素较多,物理机制是极为复杂的,对于西南旱灾的成因,有自然因素,有工程因素,也有人为因素等,归纳起来主要有以下几个方面^[2]:一是水利工程设施落后,抗灾能力不足。近些年原本湿润多雨的西南地区频频遭受严重的持续干旱,虽然在抗旱过程中水利工程发挥了积极作用,但由于许多水利设施早已年久失修,而且随着农村人口的不断增长,这些工程的功能和蓄水量已无法满足需求,很多老化失修的水利设施不堪重负,大型灌区工程设施、中小型灌区工程设施的完好率也严重偏低,许多泵站的灌排水能力达不到设计标准;水利基础设施建设相对滞后,缺乏引水、蓄水工程,使得雨季洪水成灾、旱季无水引用的现象经常出现。二是生态环境遭受严重破坏。西南大旱与该地区生态系统破坏密不可分。生态破坏是导致降水量减少和水资源匮乏的一个重要原因。过度砍伐森林资源导致水土流失严重,植被破坏改变了水循环系统的自然规律尤其是水循环的规模、时间和频率,生态系统与水循环系统之间的信息交流错乱,缺乏植被的土壤系统给水循环系统发出错误信号,使地下水—地表水—空气水循环异常,即地下水—地表水—空气水循环在规模上、空间上、时间上和频率上出现异常,从而形成非正常时间、非正常空间、非正常频率和非正常规模的水循环。水土流失又加剧了对生态的破坏,从而使生态系统陷入一个恶性循环当中。三是大气环流异常从而导致降水异常。

我国西南地区地形以山地、丘陵、盆地为主,主要是亚热带山地高原气候,地理地貌和气候情况都比较复杂。根据西南地区的环流特点,像2009~

2010年冬春的持续干旱可能在以后的相同季节内在邻近地区还会发生。同时由于全球变化,围绕青藏高原周边地区的天气气候异常现象发生的频率会加大,因此,要深入研究该地区干旱发生发展的规律、特征,分析该地区干旱成因,进一步提高对该地区的干旱监测水平和预测预警能力,为防御干旱灾害提供科学决策依据。

1 西南干旱主要特征和成因

1.1 时空分布特征及气候背景

判断一个地区是否干旱,就是要看该地区的降水多少,自然降水不足是干旱形成的直接原因,西南干旱一般不是年降水量不足所致,而主要是降水量的季节分配比例失调或时空分布不均引起的^[3],故统计分析一个地区的降水情况是研究干旱最直接的手段。而降水的变化往往伴随着温度的变化,所以,一直以来,人们在研究干旱时一般都会将降水 and 气温一块来分析。气象学者在研究某地区的干旱事件时,一般都先分析干旱事件发生时该区域降水和气温的时空分布特征,然后和历史资料进行对比分析。李永华^[4]在研究2006年夏季西南地区东部特大干旱事件时,首先分析了研究区域夏季的降水距平百分率的空间分布特征,从其降水距平百分率的空间分布图中发现,整个夏季该地区除少数几个地方外,绝大部分地区降水都比历史同期偏少。这样就能直观地看到研究区域内干旱强弱的分布情况。为了反映该区域降水的总体特征,李永华又进一步分析了降水的时间变化特征(图1a),结果发现2006年是西南地区东部1959年以来降水最少的年份,且从图1b中可以看出2006年的少雨时段主要集中在6月中旬初到9月上旬中后期,持续80多d,其中7月下旬中期到9月上旬中期,降水尤其稀少。

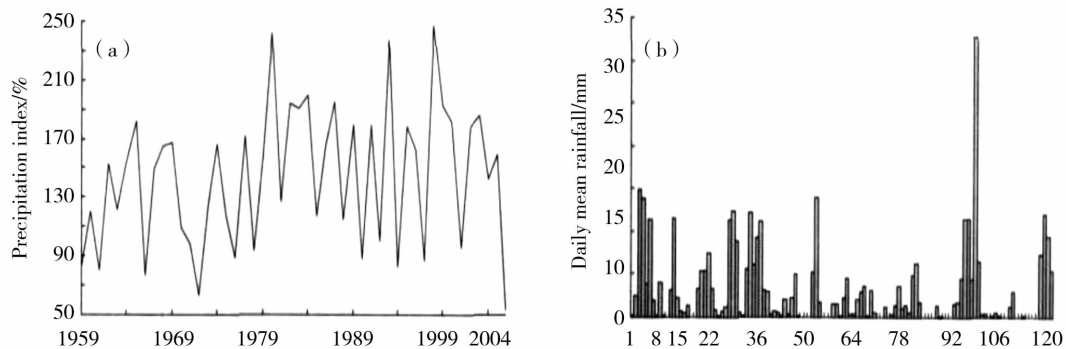


图1 西南地区东部1959~2006年降水指数变化(a)及2006年6~9月逐日平均降水量(b)^[4]

Fig. 1 Temporal evolution of precipitation index (a) in the east of southwest China from 1959 to 2006 and daily mean rainfall (b) from June to September in 2006^[4]

杨素雨等^[3]分别用降水距平百分率和温度距平方法分析了 2009 年秋季云南干旱事件中降水和气温的时空分布特征,得出 2009 年秋季降水是自 1961 年以来秋季降水最少的一年,属于降水极端偏少;全省 122 站气温都比历史同期偏高,其中大部地区偏高 1~2℃,偏高最明显的地区位于滇西北及滇中。可见,分析降水和温度可以很直观地看出研究区域干旱的分布情况。

通过计算地表湿润指数,并加以处理分析,可以得到西南地区极端干旱频率变化的空间分布图,如图 2 所示。可以看到西南地区年极端干旱频率有明显增加的地区呈块状分布,主要在四川盆地西南部、大娄山及其东部、横断山南端、广西南部 and 云南泸西等地区;而年极端干旱频率减少的地区呈零星分布,包括四川西部、南部和东北部、云南中部、广西贵州交界处等地区,它们的降低幅度比较小,只有四川西部高海拔地区的减小幅度较大。通过以上分析可以得出以下结论:近 50 a 西南地区年极端干旱频率的变化较复杂,而且极端干旱增加的地区多分布在西南季风的迎风坡和四川盆地西南周边等地势较高的区域。

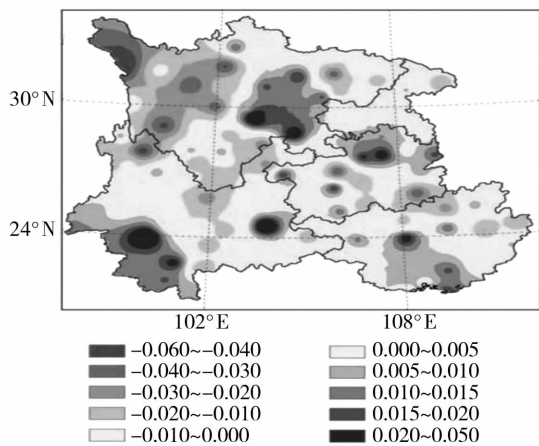


图 2 1960~2009 年西南地区极端

干旱频率变化的空间分布^[5]

Fig. 2 Spatial distribution of the extreme drought frequency in Southwest China from 1960 to 2009^[5]

黄荣辉^[1]在研究 2009 年秋季到 2010 年春季西南地区的严重旱灾时,分析了西南地区发生这次严重干旱的气候背景。从西南地区 76 测站四季降水距平的年际变化图(图略)中可以看到:西南地区夏季从 20 世纪 50 年代后期到 70 年代中期降水偏多,70 年代中期到 90 年代初夏季降水偏少,90 年代初到 21 世纪初夏季降水偏多,但在 2003~2009 年夏季降水又偏少。西南地区秋季从 20 世纪 50 年代后

期到 80 年代初降水偏多,而从 80 年代初到 21 世纪初夏季降水偏少,在 2002~2009 年期间秋季降水严重偏少。此外,西南地区从 20 世纪 50 年代后期到 60 年代初冬季降水偏多,而从 70 年代初到 80 年代后期冬季降水偏少,从 90 年代初到 90 年末冬季降水又偏多,从 90 年代末到 2009 年冬季降水又偏少。西南地区春季降水虽然总体有增加的趋势,但相对于 20 世纪,21 世纪初春季降水有所下降。以上对西南地区气候背景的分析结果表明西南地区最近几年无论夏季和秋季或是冬季和春季降水都处于偏少时期,因此 2009 年 9 月至 2010 年 4 月我国西南地区严重干旱是发生在此区域降水偏少的时期,即处于干旱时期。

此外,刘瑜等^[6]利用云南 1961~2007 年降水与气温资料进行线性趋势分析和突变检验。发现近 46 a 来云南年均降水量是趋于减少的,夏季降水量减少较为明显。从降水的季节变化特征及异常值统计结果来看,云南雨季平均降水量是趋于减少的,而干季平均降水量趋于增加。从降水的地域分布来看,滇南地区降水呈缓慢减少趋势,滇中降水呈缓慢减少后略升状态,滇西北降水呈略升趋势,滇东北降水为明显下降趋势。近 46 a 云南年平均气温是升高的,从全省气温变化的季节特征及异常值统计结果来看,春夏秋冬 4 季增温都明显,但冬季气温增加最为显著。滇中及以东地区的气温变化增暖趋势明显,滇西地区气温也为增暖的变化趋势。另外,陶云等^[7]分析了云南与初夏干旱相关的 4~5 月降水总量及平均气温的时空变化特征及其变化周期,段旭等^[8]应用降水量资料,研究了云南年、季旱涝时空变化特征。王宇^[9]分别分析了云南 18 个代表站 1951~1994 年近 40 a 降水与气温的年际变化特征,这些研究都得出了比较有意义的研究成果。

根据已有研究结果可以总结出西南地区干旱的时空特征:西南地区干旱频率在年尺度上呈西高东低的带状分布,高发区主要位于川西高原、川西南山地、云南西北部和中北部的山地、高原及河谷地带。季风期与非季风期的极端干旱变化差异很大,季风期极端干旱频率有增加趋势,干旱发生区主要是四川盆地周边海拔较高的山区、广西大部 and “帚形山脉”地带,非季风期干旱频率缓慢下降,整体偏湿。年极端干旱发生频率是季风期和非季风期的突变叠加的结果,年极端干旱存在准 5 a 和准 12 a 的周期变化。西南地区干旱频率季节差异大:冬旱频率最高,春旱次之,秋旱较低,夏旱最低,而且干旱发生频率高的地方干旱强度也大。

1.2 大气环流异常,水汽输送减少

大气环流的异常是造成天气气候异常的直接原因,是影响降水异常的直接因素,而区域性的气候异常往往是在大尺度环流异常背景下发生的。西南地区属于亚热带、温带季风气候,降水的季节分布极不均匀,每年的5~10月份,受到南亚季风的影响,西南地区的降水量增加,占全年降水的80%~90%,而11月至翌年4月,降水量稀少,只占全年的10%~20%。这样,西南地区分为明显的季风期(5~10月)和非季风期(11月至翌年4月),造成季风期和非季风期的干旱原因是不同的。长期以来,人们在研究西南干旱问题时发现,对西南地区干旱气候有影响的环流场和天气系统主要有西太平洋副热带高压、西风带环流、南亚高压、东南亚夏季风、南支槽、昆明准静止锋、热带大气季节内振荡(MJO)、北极涛动(AO)等。

西太平洋副热带高压是影响西南地区尤其是西南地区东部降水非常重要的系统。在研究2006年夏季发生在西南地区东部的特大干旱时,李永华等^[4]指出,这次干旱是副高控制性高温伏旱。西太平洋副高偏强偏北偏西,而且同时伴随南亚高压偏强偏东,西南地区东部在副高控制下,盛行下沉气流,同时也抑制了向该地的水汽输送,再加上西风带环流以及中高纬环流配置不利于冷空气南下,这些环流异常造成了西南地区东部夏季少雨干旱的结果。将2006年夏季西太平洋副热带高压特征指数与多年平均值比较,可以看到,2006年6月和7月,西太平洋副热带高压的面积都偏大,强度偏强,脊线偏北,

且较常年偏西,8月面积略偏大,但强度略偏弱,脊线偏北,且较常年明显偏西。整个夏季西太平洋副热带高压面积偏大,强度偏强,偏北偏西,使得西南地区东部长期受其控制,盛行下沉气流,酷热少雨。彭京备^[10]从观测资料分析了2006年夏季西南地区的严重干旱灾害的特征及发生成因,并指出西太平洋副热带高压和大陆副热带高压异常对2006年夏季西南地区严重干旱的发生有严重影响。

研究发现,100 hPa 的南亚高压与西南雨季有着十分密切的关系^[11]。众所周知,南亚高压的强度和位置都有十分显著的季节变化,每年的冬季南亚高压主要位于太平洋中部洋面上,高压的范围不大,中心强度很弱。夏季南亚高压中心移到青藏高原西部,高压的范围较大,中心强度很强,9月回到6月份的平均位置附近。因此,过渡季节的4、5月南亚高压的中心位置,对季风雨季的云南乃至西南来说,有着重要的影响。南亚高压的建立表示“高空季风”开始建立,同时标志着我国大部地区进入雨季。已经由许多学者研究了南亚高压与西南气候的关系^[12-14]。比如2006年夏季西南地区东部发生特大干旱时期,从2006年夏季100 hPa 位势高度场实况图(图3a)及距平图(图3b)可以看到,南亚高压较常年位置偏北偏东,强度明显偏强,西南地区东部整个夏季都几乎受南亚高压的持续控制,又由于南亚高压与西太平洋副热带高压进退具有一定的制约关系,具有相向而行、相背而去的特点^[15-16],西太平洋副热带高压偏北偏西,持续控制西南地区东部,使得该地降水明显偏少,导致特大干旱灾害的发生。

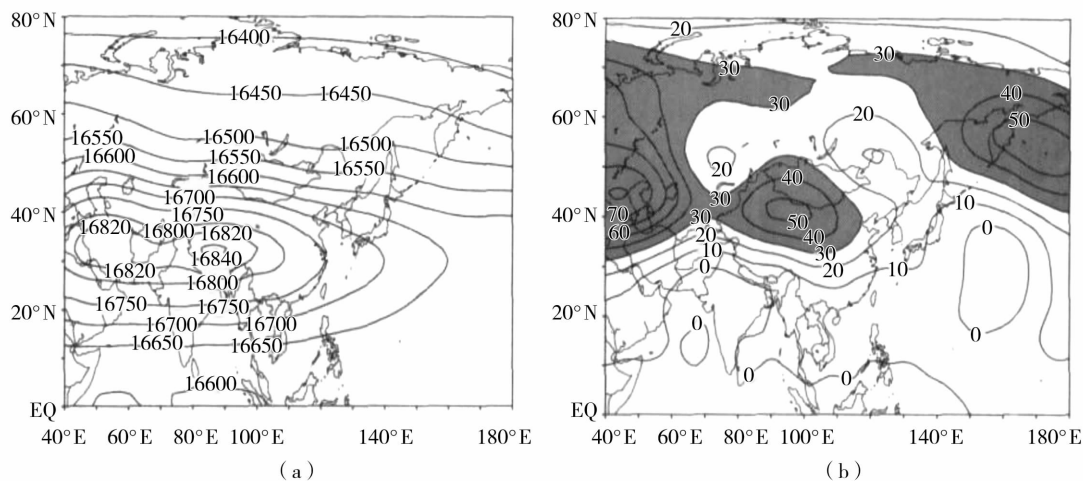


图3 2006年夏季100 hPa 高度场(a)及其距平(b) (单位:gpm)^[4]

Fig. 3 The 100 hPa geopotential height field (a) and it's anomalies (b) in summer 2006 (Unit:gpm)^[4]

西风带对中低纬地区降水影响较大,西风带环流强弱影响到南下冷空气的活动强度与频率,从而影响冷空气南下所经过地方的降水。杨辉等^[17]指出,西风带环流系统异常是造成 2009~2010 年云南干旱灾害的主要成因。欧洲东部到里海以及青藏高原上高压脊强烈发展,使得西风带的扰动系统不易东移到东亚上空。刘瑜等^[18]分析了 2005 年 4~6 月亚洲地区逐候西风环流指数,发现这段时期的经向环流一直在亚洲地区北部维持,阻止了西太平洋副高的北抬,同时,使弱冷空气无法向南输送,使整个西风带系统(西风急流)明显偏南,这与 5 月 100 hPa 南亚高压位置偏南,副高东退出南海偏晚,云南气候季节性转换推迟相对应。

研究表明,南支槽是冬半年影响南亚和东亚的主要天气系统。南支槽即冬半年在高原南侧孟加拉湾地区的半永久性低压槽。西南地区的干旱与南支槽活动及整层水汽输送有着密切的关系。丁一汇^[19]指出冬季副热带急流从高原南缘通过,西风急流中的低槽可从印度西北里海地区南下,在喜马拉雅山南麓东移,移出印度后可到达中国,影响我国的天气,这就是南支槽。由于南支槽中西风经过孟加拉湾地区而携带大量的水汽,故与冷空气结合便可造成大范围的雨雪天气^[20]。南支槽与降水的关系方面,人们已经做了许多研究^[21-25]。张腾飞^[26]通过对 2000 年以来云南出现的 4 次强降雪过程进行分析,指出南支槽前暖湿气流和强冷空气汇合是造成云南降雪的主要形势。许美玲等^[22]利用 MM5 中尺度非静力模式对 2003 年 1 月 5~6 日发生在云南省的强降水天气过程进行了数值模拟,指出造成云南冬季暴雨的主要影响系统是偏南低空急流,而南支槽前的辐散为低空急流形成提供了启动机制。董海萍等^[27]对比分析了 2001 年 5 月云南严重洪涝与 2005 年 5 月云南严重干旱的环流特征,指出了南支槽对于水汽输送的重要性。王斌^[28]等通过分析 2009 年 10 月至 2010 年 3 月西南地区干旱,指出南支槽强度持续偏弱,槽前西南气流水汽输送减弱,使得到达我国西南地区水汽相应减少,从而造成了西南地区严重干旱。从图 4 的 1951~2009 年西南地区 11~3 月降水距平和 11 月南支槽指数距平年际变化对应关系可以看到我国西南地区 11~3 月降水偏多的年份和南支槽偏强的年份基本对应,这说明降水偏多的年份南支槽水汽输送充足。只是降水偏少的年份与南支槽强度的对应关系不如降水偏多年,具体原因有待进一步研究。

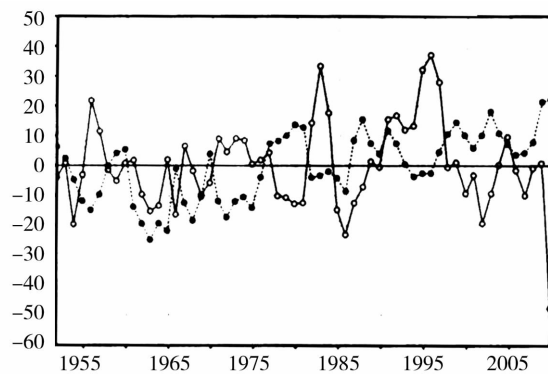


图 4 经过 5 点 3 次平滑后的 1951~2009 年西南地区 11~3 月降水距平(实线)和 11 月南支槽指数距平(虚线)年际变化^[28]

Fig. 4 The interannual variation of the anomaly of precipitation in southwest China from Nov. to Mar. after cubical smoothing algorithm with five-point approximation (solid line) and the anomaly of south branch trough index in Nov. (dotted line)^[28]

此外,一些学者还研究了 MJO^[29-32]、昆明准静止锋^[33]、AO^[34-37]、北大西洋涛动 (NAO) 等对西南干旱的影响,得到了很多比较有意义的研究结果,例如,研究发现在 NAO 为负位相的背景下,云南冬季降水偏少^[17]。

水汽输送不仅与大气环流有着密切的内在联系,而且是全球能量和水分循环过程的重要一环,对区域水分平衡起着重要作用,水分循环及水汽输送是全球气候系统内的一个重要子系统,是气候系统中动力、热力过程中的一个重要过程,而水汽输送的异常,则是导致一个地区旱涝变化的重要因素之一。西南地区水汽来源主要是孟加拉湾地区的暖湿气流。水汽输送受大气环流的影响很大,一般都二者结合起来研究。对于西南地区的水汽输送,已经有大量学者进行了比较详细的研究^[38-40]。李永华等^[41]分析了西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征,指出与西南地区东部夏季降水相联系的水汽通道中,印度洋水汽通道强度最强,太平洋水汽通道强度最弱。另外,西南地区东部夏季水汽有弱的净流出,是一个弱的水源区,干旱年水汽流出较常年明显。

西南地区的水汽来源主要是由印度洋和孟加拉湾的水汽输送。当大气环流发生异常时就会导致大气中的水汽无法到达西南地区,或是冷暖空气无法在西南地区正常交汇,从而导致西南地区降水减少,发生干旱。由于控制西南地区的大气环流在不同季节有明显的不同,故不同季节发生的干旱原因不一

定相同。比如,有些时候主要受副高影响,有些时候南亚高压对西南地区的影响占主导地位。中高纬影响西南地区的环流系统主要有南亚高压、西太平洋副热带高压和西风带环流。例如2005年初夏发生在云南的严重的干旱天气。研究发现造成这次历史罕见异常干旱气候的主要原因是南亚高压季节性北跳比正常年份偏晚,从极地来的冷空气强度也比正常年份偏弱不少。此外,位于亚洲地区上空的经向环流使西太平洋副高偏强、偏西、偏南,中高层大气环流季节转换相比于正常情况发生滞后^[18]。另外,在厄尔尼诺事件对西南干旱也有很明显的影[42-44]。在厄尔尼诺事件发生时,南海、中南半岛到西印度洋的对流活动受到抑制,不利于孟加拉湾和中南半岛以及云南地区的暖湿气团活动,导致降水偏少。太平洋表层的热流向东走,将热带水汽带走,热带水汽减少,由南方进入到西南的水汽也偏少了。在拉尼娜年,则正好相反。

1.3 青藏高原的作用

西南地区位于青藏高原边缘,其对西南地区的大气环流影响很大。因此,在研究西南的干旱问题时,青藏高原的影响是必须要考虑的一个重要因素。青藏高原平均海拔4 500 m以上,面积约 $260 \times 10^4 \text{ km}^2$,它不仅形成了独特的高原高寒气候,而且对东亚大气环流产生深刻影响。青藏高原对西南干旱的影响,主要是高原的热力作用^[33]影响。高原大气作为一个热源,每平方厘米的大气柱每天要向四周大气输送40~50卡的热量。这个热源的机制主要是高原的感热和长江中下游地区降水潜热的释放。在夏季,由于高原受到强烈的辐射,地面气温上升明显,比周围的同高度自由大气要高,于是在近地面形成高温低压中心。这个高温低压中心迭加在印度热低压之上,使印度热低压的势力增强,为印度季风的加强和爆发提供了有利条件,也促进了我国西南季风的增强。青藏高原高空是一个暖性高压——青藏高压。青藏高压的强弱和位置的变化可影响我国东部地区的天气状况。当青藏高压南侧的下沉气流与副热带高压南侧的下沉气流处于下沉辐合区,系统控制长江中下游地区,可使长江中下游地区气候异常干热。冬季,由于巨大的高原地势很高,冰雪覆盖面积大,空气很稀薄,辐射冷却快,降温迅速,成为了一个低温高压中心。在这样的背景下,加大了高原与南侧自由大气间的温度梯度,使高空等压面向高原倾斜,结果导致西风南支气流加强南侵。此外,该低温高压中心迭加在蒙古高压之上,使高原东北侧的绕流高压与蒙古高压的南下气流汇合,使冬季风

的势力大大增强^[45]。黄荣辉等^[1]在研究2009年秋季至2010年春季西南地区的严重干旱事件时发现,青藏高原东南部、中部上空有西北气流异常,这使得孟加拉湾来的水汽不能流向我国西南地区,造成了在该区域降水严重偏少,发生了严重干旱。杨辉等^[9]研究发现,云南省冬季降水偏少时,青藏高原高压脊发展并控制了我国云南省,给该地区干旱的出现造成有利条件。王兴菊^[10]指出,2009年9月到2010年3月发生在贵州省的干旱是由于2009年秋季以来青藏高原上空的气压场持续偏强,造成高原南侧的暖湿水汽输送较常年同期明显偏弱。同时,影响我国的冷空气活动路径偏北、偏东,很难渗透到云贵高原腹地,这些气象条件导致冷暖空气很难在西南地区交汇,从而使得降水持续偏少。

华明^[46]研究了青藏高原热状况与西南降水的关系。他分析了青藏高原地面气温与川渝地区降水的相关性,得出2月青藏高原地面气温与川渝地区降水相关系数的空间分布图(图5)。从图中可以看出冬季青藏高原热状况与西南地区同期降水呈负相关关系。华明在研究中还发现青藏高原冬季热状况与四川盆地降水有滞后3个月的正相关,即12月高原温度与3月四川降水、1月高原温度与4月四川降水间存在正相关关系。这对降水等的预测有一定的指示意义。当冬季高原温度异常偏高时,其产生的上升运动距平将诱发后期季风环流的加强、副高位置的偏北,从而导致春季、初夏四川盆地降水的增加;反之,则导致降水减少。

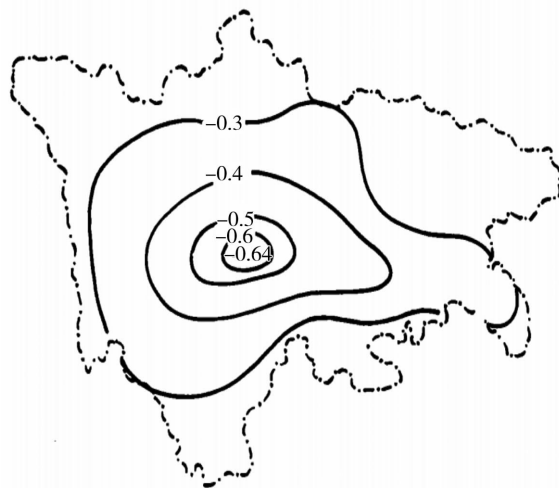


图5 2月青藏高原地面气温与川渝地区降水的相关^[46]

Fig.5 The correlative distribution between temperature of Qinghai - Xizang Plateau and precipitation of Sichuan - Chongqing regions in February^[46]

李永华等^[47]在研究青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系时,指出了影响西南地区东部夏季旱涝的热源关键区域。通过分析得出了西南地区东部夏季降水指数与夏季青藏高原大气热源的相关场分布图及典型涝年与旱年夏季青藏高原大气热源差值场图(图 6)。可以看出,当关键区大气热源

偏强时,西南地区东部夏季降水偏多的可能性大;反之,当该区域大气热源偏弱时,西南地区东部夏季降水偏少的可能性大。西南地区东部夏季典型洪涝年和干旱年的青藏高原大气热源差值场也体现了西南地区东部夏季洪涝年关键区热源偏强,而干旱年关键区热源偏弱的特征。

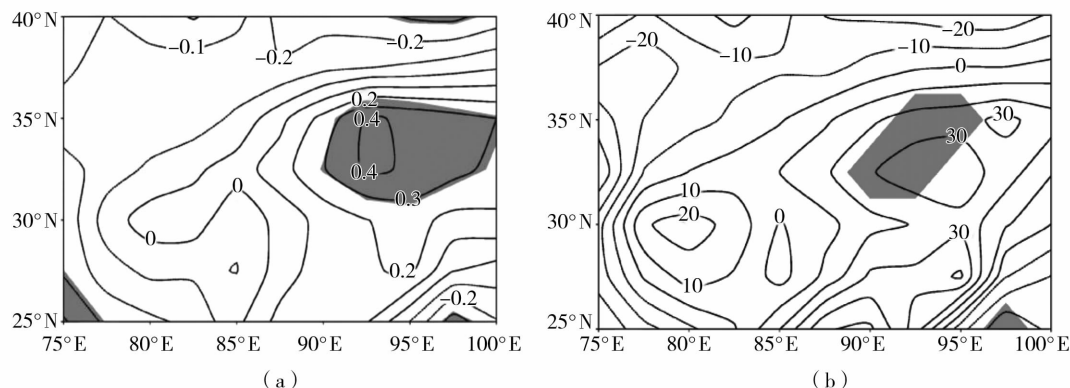


图 6 西南地区东部夏季降水指数与夏季青藏高原大气热源的相关场(a)及典型涝年与旱年夏季青藏高原大气热源差值场(b)(单位: W/m^2)(阴影:通过 95% 置信水平的统计检验^[47])

Fig. 6 The correlation field between summer rainfall index in eastern southwest China and summer atmospheric heat source over the Tibet Plateau (a) and the deviation field of summer atmospheric heat source over the Tibet Plateau between typical flood and drought years (Units: W/m^2) (b). (The areas over the 95% confidence level are shaded^[47])

1.4 热带洋面热力状况对西南干旱的影响

海洋是地球气候系统最重要的组成部分,海温异常可维持或加强大气环流的异常,而大气环流的异常反过来又可以改变海洋环境和海温分布,从而改变海气之间的能量交换。大尺度海气耦合相互作用对气候的形成及变化有重要影响,海温异常变化,使大气环流和水汽输送发生异常,从而造成一些地区发生旱涝灾害。因此,气候研究必须考虑海洋的存在及海气相互作用。许多专家和学者^[48-52]针对海温异常对中国天气气候的影响作了较多的分析研究,结果表明,ENSO 事件、西太平洋暖池、印度洋海温和南海海温异常对亚洲季风、西太平洋副高、南亚高压等环流系统有影响,进而对中国的天气气候产生影响。西南地区距离太平洋和印度洋都比较近,可能同时受到热带太平洋和印度洋海温异常的影响。研究发现,发生在我国西南地区的干旱和热带洋面的热力状况有着很明显的相关关系。关于海温异常对西南地区东部夏季降水(旱涝)的影响已经有了一些研究,如张强等^[53]对长江上游旱涝灾害与 SST 指数的相关分析表明,厄尔尼诺事件使长江上游发生旱灾的几率增大,而拉尼娜事件则使长江上

游发生涝灾的几率增大;马振锋等^[54]提出了春季太平洋暖池强度能较好地指示川渝地区主汛期降水的分布;鲍媛媛等^[55]研究了前期海温与西南地区东部夏季旱涝的关系,指出 2006 年 1~3 月赤道东太平洋海温呈显著负距平、南太平洋 20~40°S 海域海温呈显著正距平,这一形势促使西南地区东部出现严重干旱。李永华等^[56]综合分析了西南地区东部夏季旱涝与前期热带太平洋—印度洋 SST 变化的关系,指出当前期春季赤道中东太平洋和印度洋 SST 异常变化会对西南地区东部夏季旱涝造成影响。当春季赤道中东太平洋及印度洋海表温度(SST)偏高(偏低)时,夏季南亚高压位置偏南(偏北),强度偏强(偏弱),面积偏大(偏小),而西太平洋副高强度偏强(偏弱),面积偏大(偏小),位置偏南(偏北),西伸(东退)明显,东亚夏季风和南亚夏季风偏弱(偏强),西南地区东部盛行弱的上升(下沉)运动,这有利于西南地区东部降水偏多(偏少),出现洪涝(干旱)的可能性大。

在研究 2009~2010 年的西南干旱时,黄荣辉等^[1]发现,该时段正好对应厄尔尼诺事件的衰减期,热带西太平洋上空对流层下层出现反气旋环流

异常,然后从热带西太平洋经南海到孟加拉湾上空对流层下层出现反气旋环流异常,正是这个反气旋环流异常导致了我国西南地区这次持续性严重干旱。杨素雨等^[3]分析发现,云南秋季降水与赤道中印度洋和中太平洋对流活动有显著负相关,与赤道西太平洋地区对流活动有显著正相关。

1.5 其他方面

大部分学者在研究西南地区的干旱时,都是从降水和温度时空分布、大气环流异常以及与海温的相关等这些方面来分析。但是西南地区的干旱有着复杂的原因,很多因素都和西南干旱有关联。于是就有一些学者从不同的角度来研究西南干旱问题。比如,通过计算大气可降水量来研究西南干旱问题,这对人工影响天气等很多工作都具有重要应用意义。郭洁等^[57]利用1972~2002年川渝地区地面气象资料和探空站高空气象资料,计算了川渝地区整层大气可降水量的气候分布并分析了近30a来的气候变化趋势,探讨了整层大气可降水量与地面气温、降水量的关系,特别是夏季大气可降水量与旱涝年、大范围暴雨天气过程之间的关系。并根据地面湿度参量拟合出川渝地区整层大气可降水量与地面水汽压、地面露点温度的统计关系式。也有一些学者分析了高原积雪与西南干旱的相关关系^[58-59],发现西南地区夏季降水与冬、春季高原积雪有显著的相互关系,前期高原积雪日数的变化对未来西南地区夏季降水有明确的指示和预测意义。此外,还有学者研究了OLR^[60]与西南干旱的关系,研究发现,在西南地区东部旱涝年,热带及副热带地区的OLR及其低频分量的分布及传播有很大的差别,而这种差别甚至早在5月份就已经体现出来,这为夏季降水预测提供了一定线索。

2 西南干旱监测和预测

由于干旱自身的复杂性及其影响的深远性,要想准确、量化地监测到干旱的起始时间、持续时间、结束时间以及干旱的覆盖范围、强度及干旱的影响评价是非常困难的^[61]。对于不同类型的干旱,例如气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱等^[62-65],决定干旱开始和结束的标准差别很大。因此,为了监测研究干旱及其变化,科学家们利用较容易获得的气温、降水量等气候要素,研究发展了许多不同的干旱指数。这些干旱指数包含了降水量、雪盖、气温、蒸发量、径流、土壤含水量等众多的基础资料,最终将这一系列的基础资料综合到一起形成简单的指标数字。干旱指数是表示干旱程度的特征

量,它是旱情描述的数值表达,在干旱分析中起着度量、对比和综合等重要作用。这些干旱指标比起原始观测资料能更加直观地反映一个地区的干旱情况,比那些繁杂的基础资料具有更强的可利用性。降水是气象干旱的主要影响因素,因此气象干旱指数多以降水量为基础而制定。国内外常用的气象干旱指标大致有以下几种:气象干旱综合指数(CI指数)、标准化降水指数SPI和Z指数、Palmer干旱指数、湿润度和干燥度指标以及对这些指数改进而得到的一些指数等等。由于每个地区都有其不同于其他地区的地形及气候条件,所以,要找到一个普适的干旱指数基本是不可能的。我国西南地区地形和气候条件都较为复杂,要找到适用于该地区的干旱指数就必须把当地的特殊环境考虑进去。许多学者用干旱指数的方法对西南地区的干旱进行了分析研究,得到了很多有价值的结果。尽可能找到与西南地区相适应的干旱指数,科学地评估该地区干旱发生状况,准确地监测该地区干旱的发生发展趋势,并利用干旱指数在西南地区的不同时段对干旱进行监测与预警是十分必要的。

钱维宏在研究西南干旱气候时分析对比了历史气象干旱综合指数(CI指数)和2009~2010年单次干旱事件的CI指数,如图7所示。可以很清楚地看到该时段西南地区干旱的发展态势。

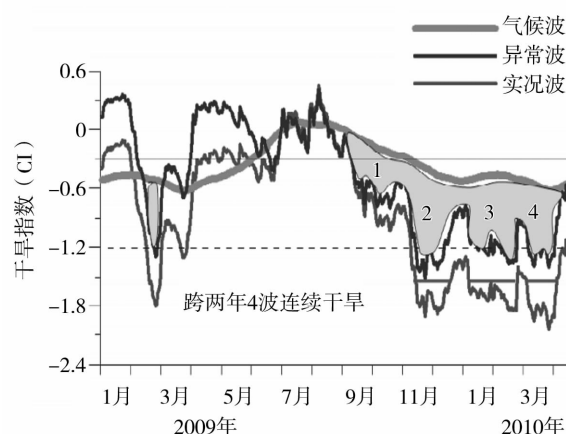


图7 我国西南地区多年平均CI指数的逐日变化、2009年1月1日至2010年4月13日实际观测的CI指数的逐日变化以及异常变化^[66]
(异常变化:同期观测干旱指数与气候干旱指数的差,数值1~4指示4段干旱期,每段干旱期中又有2次干旱波动)

Fig. 7 The daily variation of mean annual average of CI index and the actual observation CI index from January 1, 2009 to April 13, 2010 in the southwest of China, and the abnormality^[66]

用降水距平百分率(Pa)、K 干旱指数与综合气象干旱指数(CI)这 3 种干旱指数对贵州省安顺市 2009 年夏秋季到 2010 年冬春季发生的历史罕见的干旱过程进行比较分析^[67],发现 3 种干旱指数对此次历史罕见的干旱灾害的干旱时段、干旱发展缓解解除阶段均有一定的指示意义。此次干旱过程是一次涉及气象、水文、农业、社会经济方面的综合性特大干旱过程,3 种指数对干旱发展趋势的描述基本一致,K 指数最能体现冬春季农业和大部分时段水文干旱的实况,CI 指数可体现大部分地区农业干旱的实际情况,K 干旱指数对夏秋季旱情评估偏重,但由于其考虑了蒸发,对水文上水分的欠缺有一定的反映,对干旱彻底解除的时间判定较为合理。降水距平百分率则不够稳定,特别是在降水基数少的时段,对干旱结束时间判定较差。对月和季干旱的评定,冬季干旱最严重的时段,K 指数评定最好,CI 和降水距平百分率则对夏秋季干旱评定较为合适。赵海燕等^[68]在研究西南干旱时,针对西南的地理气候特征对综合气象干旱指数 CI^[69]进行了修正,发现修正后的指数减少了干旱发展过程中的不连续加重现象,且与同期土壤湿度有更好的相关性,更适合在西南地区实时干旱监测业务中使用。梁成等^[70]利用 WAP 指数对长江流域及其以南地区干旱的主要特征进行综合分析,发现 WAP 指数可以很好地表征一段时间内的降水状况,它主要考虑了前期降水对后期土壤湿度的贡献,可以对干旱进行动态和量化的监测,可以较好地反映干旱和洪涝等极端气候状况。此外,近些年还有许多学者对不同于干旱指数在西南干旱监测中的应用进行了研究^[71-75],得到了很多适用于区域范围的特定时段的干旱指数,对提高西南地区的干旱监测业务帮助很大。比如王佳津等^[74]通过建立云南省 Palmer 旱度模式分析了西南干旱气候的变化特征,如图 8 所示。利用计算得到的 Palmer 指数值 PDSI 为指标得到的云南省 30 a 平均干旱程度序列,从图中可以看到云南省干旱有明显的年际和年代际波动,2009 年末到 2010 年初的春季大旱是最强的一次干旱,所建立的 Palmer 旱度模式能够较好地反映云南省的旱涝情况。考虑到云南干旱的季节性特征,王学峰^[75]根据云南的气象灾害历史资料建立了云南省动态气象干旱强度指数,经实际验证效果很不错。

除了用干旱指数对干旱进行监测外,近些年,随着卫星技术的不断进步,业务部门越来越多的用遥感的方法进行干旱监测。遥感监测的干旱通常是指农业干旱,而农业干旱的本质是土壤水分含量过低,

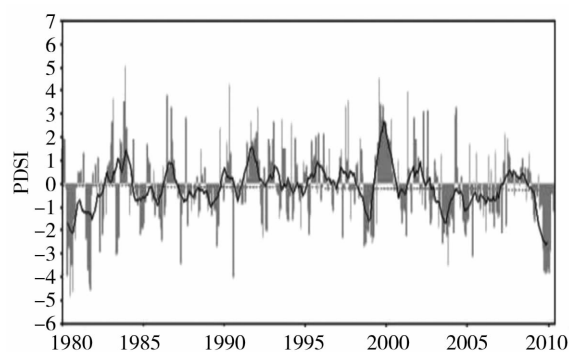


图 8 云南省干旱程度序列^[74]
(柱形图为平均 PDSI,实线为 11 个月
滑动平均曲线,虚线为线性变化趋势)

Fig. 8 Sequence of drought severity
in Yunnan Province^[74]

无法满足植被对水分的需求,所以干旱监测的本质是监测土壤水分含量,通过土壤含水量的分布和多少来反映干旱的分布范围和干旱程度。遥感对干旱的监测主要有旱情遥感监测、地表可用水资源遥感监测以及干旱对农作物的影响等。随着遥感技术的迅速发展,多时相、多光谱遥感数据从定性、定量等方面反映了大范围的地表信息,为实时动态的干旱遥感监测提供了有效的数据来源,为旱情监测开辟了全新的途径。但是,干旱遥感监测受到天气的影响较大,比如当空中云层太厚时,遥感监测可能就无法正常进行了。传统的遥感监测干旱的方法,主要通过地对地表各参数的反演来获得土壤信息。事实上,地表的干旱与大气的状况有着密不可分的关系,气象上也常用降水量降水标准差干燥度等指数来进行干旱的监测和研究,随着遥感技术的发展,利用卫星遥感资料进行大范围水汽反演成为可能,因此监测大气中水汽的变化是遥感干旱监测和预警的有效方法。郭巍^[76]等利用 MODIS 数据反演大气含水量,以 TVDI 作为旱情评价的指标,并结合气象观测的探空资料、天气图以及 NCEP 月平均气温等资料,提出 2010 年春季西南干旱是大气环流、大气能量结构以及地热蒸发等因素的综合作用导致的结果。考虑到西南地区独特的地理环境,许多旱情评估用到的指标都需要进行修正。

一直以来,干旱预测对气象工作者都是一个难题。很多专家学者都在通过各种手段探索如何进行干旱预测。关于我国西南地区的干旱预测,也有一些专家进行了探索研究,并取得了一定的成果。西南干旱的预测手段,归纳起来主要有利用大气低频诊断方法进行干旱预报,利用 MJO 活动的规律对云

南降水延伸期预测,地气图方法预测干旱,数值预报模式等。其中一些预报方法已经在个别地区开始了业务应用,取得了不错的效果。但我们必须认识到,由于西南地区特殊的地理位置,该地区天气气候既受青藏高原的影响,也同时受南亚(印度)季风和东亚季风的影响,因此这里的天气气候成因非常复杂,旱涝预测非常困难,因此今后还需要做大量的工作,将多种监测手段综合起来运用,找到最适合西南地区的干旱监测手段,进一步提高该区域干旱短期气候预测水平。

3 总结和讨论

日益严重的全球化干旱问题严重威胁着人类的生存环境,已成为各国科学家和政府部门共同关注的热点。我国西南地区近些年发生的历史罕见异常干旱更是引起极大的关注。本文主要综述了西南干旱的时空分布特征、成因、监测和预测方法等。西南地区干旱频率在年尺度上呈西高东低的带状分布。西南干旱在季风期与非季风期的变化差异很大,季风期极端干旱频率有增加趋势,非季风期干旱频率缓慢下降,整体偏湿。年极端干旱发生频率是季风期和非季风期的突变叠加的结果,年极端干旱存在准5 a和准12 a的周期变化。西南地区干旱频率季节差异大:冬旱频率最高,春旱次之,秋旱较低,夏旱最低,而且干旱发生频率高的地方干旱强度也大。分析发现,西南干旱发生的频率、范围和强度在近几年有增大的趋势。造成西南干旱的因素有很多,主要有大尺度大气环流、局地天气系统、印度洋及太平洋海温异常、高原积雪、对流的强弱、水汽输送路径、低层低纬度赤道气流的建立、夏季风的建立等等。这些因素对西南地区的干旱都有影响,有待于我们做更深入更细致的研究。干旱指数是西南地区干旱监测的有效手段,需要注意的是特定的干旱指数对不同区域不同时段不一定都适用,所以,要通过对对比分析找到最适合的干旱指数,或者根据西南地区的地理气候特征对已有的干旱指数进行修正。目前对于西南地区的干旱预测还未达到业务化预报的程度,仅有的一些研究工作多借助纯数学工具,通过分析影响干旱的降水、气温等气象因素的变化趋势和影响该区域环流系统的发展规律,来定性预测未来一段时间发生干旱的可能性或者概率,缺乏关于严格的干旱物理机制支持,建立气象预报、水文模型、植被需水模型相结合的联合干旱预测模型将是开展干旱预测研究很有生命力的发展方向。

针对西南干旱,气象学者已经进行了大量的研

究,也取得了许多成果,但我们必须认识到,关于西南干旱还有许多未解决的问题。造成西南干旱的机制是很复杂的,目前只是研究了其中的一部分,要真正搞懂影响西南干旱的机制这些还远远不够。另外,目前用于西南的干旱监测手段局限性比较大,像遥感监测就容易受到天气的影响。对西南干旱的预测准确率不够高,仍处于初级阶段。今后,要继续根据西南地区地理气候特征,结合该区域的主要影响系统,更深入的研究西南干旱的机制,以便更准确地预测未来该区域的干旱发展趋势,为政府决策提供可靠依据,进而减少西南干旱给人们带来的损失。

参考文献:

- [1] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457.
- [2] 何其多. 西南旱灾的原因分析[J]. 价值工程, 2011: 304-306.
- [3] 杨素雨,张秀年,杞明辉,等. 2009年秋季云南降水极端偏少的显著异常气候特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 317-324.
- [4] 李永华,徐海明,刘德,等. 2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J]. 气象学报, 2009, 67(1): 124-134.
- [5] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190.
- [6] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近46年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 39-44.
- [7] 陶云,郑建萌,黄玮,等. 云南春末夏初干旱的气候特征[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 124-132.
- [8] 段旭,尤卫红,郑建萌. 云南旱涝特征[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 84-90.
- [9] 王宇. 云南气候变化概论[M]. 北京:气象出版社, 1996.
- [10] 彭京备,张庆云,布和朝鲁. 2006年川渝地区高温干旱特征及其成因分析[J]. 气候与环境研究, 2007(12): 464-474.
- [11] 秦剑,据建华,解明恩. 低纬高原天气气候[M]. 北京:气象出版社, 1997. 14-60.
- [12] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [13] 刘瑜,马振峰,陶云,等. 云南2002年雨季偏早的环流特征分析[J]. 高原气象, 2003(增刊): 102-109.
- [14] 秦剑,解明恩,刘瑜,等. 云南气象灾害总论[M]. 北京:气象出版社, 2000. 16-64.
- [15] 陶诗言,朱福康. 夏季亚洲南部100毫巴流型的变化及其与太平洋副热带高压进退的关系[J]. 气象学报, 1964, 34(4): 385-395.
- [16] 张琼,吴国雄. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 569-577.
- [17] 杨辉,宋洁,晏红明,等. 气候与环境研究. 2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 17(3): 315-326.
- [18] 刘瑜,赵尔旭,彭贵芬,等. 2005年春末初夏云南异常干旱与中高纬度环流[J]. 干旱气象, 2007, 27(1): 25: 32-37.
- [19] 丁一汇. 高等天气学(第二版)[M]. 北京:气象出版社, 2005. 266.

- [20] 秦剑, 琚建华, 解明恩, 等. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 200.
- [21] 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 中国南方地区冬季风降水异常的分析[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 594–604.
- [22] 许美玲, 段旭. 云南冬季一次强降水天气过程的模拟与分析[J]. 高原气象, 2007, 36(2): 414–421.
- [23] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 II. 2005 与 2001 年 5 月云南旱涝成因的对比分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 460–473.
- [24] 秦剑, 潘里娜, 石鲁平. 南支槽与强冷空气结合对云南冬季天气的影响[J]. 气象, 1991, 17(3): 39–43.
- [25] 郭荣芬, 高安生, 杨素雨. 低纬高原两次冬季南支槽强降水的对比分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 82–88.
- [26] 张腾飞, 鲁亚斌, 张杰, 等. 2000 年以来云南 4 次强降雪过程的对比分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 64–72.
- [27] 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 I. 2001 年 5 月印缅槽维持期间云南暴雨及其中尺度特征[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 443–459.
- [28] 王斌, 李跃清. 2010 年秋冬季西南地区严重干旱与南支槽关系分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 28–37.
- [29] 白旭旭, 李崇银, 李琳. MJO 对中国春季降水影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2012, 70(5): 986–1003.
- [30] Li Ting, Ju Jian-hua, Gan Wei-wei. The relationship of the preceding winter MJO activities and the summer precipitation in Yangtze-Huaihe River basin of China[J]. J Trop Meteor, 2012, 18(1): 32–44.
- [31] 吕俊梅, 琚建华, 任菊章, 等. 热带大气 MJO 活动异常对 2009–2010 年云南北极干旱的影响[J]. 中国科学(地球科学), 2012, 42(4): 599–613.
- [32] 李汀, 严欣, 琚建华. MJO 活动对云南 5 月降水的影响[J]. 大气科学, 2012, 36(6): 1101–1111.
- [33] 周秉根, 陈建业, 何俊杰, 等. 2009–2010 年冬春季节我国西南地区持续干旱的成因分析[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 52–55.
- [34] 张静, 李跃清, 蒋兴文. 东亚冬季风的时空变化及其与 ENSO、MJO 相互关系的研究进展[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(3): 89–96.
- [35] YANG Hui. The Significant Relationship between the Arctic Oscillation (AO) in December and the January Climate over South China[J]. 2011, 28(2): 398–407.
- [36] 琚建华, 吕俊梅, 谢国清, 等. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 401–406.
- [37] 宋洁, 杨辉, 李崇银. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1009–1019.
- [38] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛. 水汽输送对云南夏季风暴发及初夏降水异常的影响[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 25–37.
- [39] 蒋兴文, 李跃清, 李春. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 476–484.
- [40] 周长艳, 李跃清, 李薇. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 880–888.
- [41] 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 172–183.
- [42] 刘建刚, 王金红, 谭徐明, 等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区干旱及与历史场次干旱对比分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, (31)2: 196–200.
- [43] 张人禾, 黄荣辉, El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析[J]. 大气科学, 1998, 22: 587–599.
- [44] Zhang Renhe, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asia Monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events[J]. J Meteor Soc Japan, 1996, 74: 49–62.
- [45] 周秉根, 万荣荣, 刘万青. 中国东部“冷槽”和“热脊”形成机制分析[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2001, 24(2): 141–143.
- [46] 华明. 青藏高原热状况对夏季西南地区气候影响的分析及模拟[J]. 高原气象, 2003, 22(增刊): 152–156.
- [47] 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(3): 422–434.
- [48] 李崇银, 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. 大气科学, 2001, 25(4): 433–443.
- [49] 刘颖, 倪允琪. ENSO 对亚洲夏季环流和中国夏季降水影响的诊断研究[J]. 气象学报, 1998, 56(6): 681–691.
- [50] 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响—大气中的两级热力适应[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 513–522.
- [51] 王钟睿, 钱永甫. 印度洋、南海和东南沿海海温异常影响江淮流域 6~7 月降水量的分析及数值模拟[J]. 应用气象学报, 2005, 16(4): 527–537.
- [52] 肖子牛, 晏红明. El Niño 位相期间印度洋海温异常对中国南部初夏降水及初夏亚洲季风影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 173–183.
- [53] 张强, 姜彤, 吴宜进. ENSO 事件对长江上游 1470–2003 年旱涝灾害分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 691–696.
- [54] 马振峰, 谭友邦. 预测川渝地区汛期降水量的一种物理统计模型[J]. 大气科学, 2004, 28(1): 138–145.
- [55] 鲍媛媛, 康志明, 金荣花, 等. 川渝地区夏季旱涝与海温异常浅析[J]. 气象, 2007, 33(5): 89–93.
- [56] 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 热带太平洋—印度洋海表温度变化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 145–156.
- [57] 郭洁, 李国平. 川渝地区大气可降水量的气候特征以及与地面水汽量的关系[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 344–350.
- [58] 沈浒英, 陈瑜彬. 2009–2010 年长江上游地区旱情成因分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 12–14.
- [59] 周浩, 唐红玉, 程炳岩. 青藏高原冬春季积雪异常与西南地区夏季降水的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1144–1151.
- [60] 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 西南地区东部夏季典型旱涝年的 OLR 特征[J]. 高原气象, 2009, 28(4): 861–869.
- [61] 王有民, 张强, 邹旭恺. 干旱指标研究进展及国家级干旱监测业务介绍[A]. 中国气象学会 2007 年年会气候学分会论文集[C].
- [62] World Meteorological Organization. Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. WMO – No. 1006, 2006, 24.
- [63] Keyantash J, Dracup J A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 2002, 83:

- 1167–1180.
- [64] Richard R, Heim J. A review of twentieth – century drought indices used in the United States [J]. Bull Am Meteorol Soc, 2002, 83: 1149–1165.
- [65] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions [A]. Droughts: A Global Assessment [M]. D A Wilhite, Ed. Routledge, 2000. 3–18.
- [66] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图 [M]. 北京: 气象出版社, 2011. 132.
- [67] 吴哲红, 詹沛刚, 陈贞宏, 等. 3 种干旱指数对贵州省安顺市历史罕见干旱的评估分析 [J]. 干旱气象, 2012, 30 (3): 315–322.
- [68] 赵海燕, 高歌, 张培群, 等. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性 [J]. 应用气象学报, 2011, 22 (6): 698–705.
- [69] 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 气象干旱等级. GB/T 20481, 中华人民共和国国家标准 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2006. 1–17.
- [70] 梁成, 申双和. 基于 WAP 指数的长江流域及其以南地区干旱气候特征分析 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2010, 2 (2): 166–174.
- [71] ZENG Hongwei, LI Lijuan, LI Jiuyi. The evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin [J]. J Geogr Sci, 2012, 22 (2): 273–282.
- [72] 白开旭, 刘朝顺, 施润, 等. 2010 年中国西南旱情的时空特征分析——基于 MODIS 数据归一化干旱指数 [J]. 地球信息科学学报, 2012, 14 (1): 32–48.
- [73] 张文江, 陆其峰, 高志强, 等. 基于水分距平指数的 2006 年四川盆地东部特大干旱遥感响应分析 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38 (2): 251–260.
- [74] 王佳津, 孟耀斌, 张朝, 等. 云南省 Palmer 旱度模式的建立——2010 年干旱灾害特征分析 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21 (1): 190–197.
- [75] 王学锋. 区域动态气象干旱强度指数及其应用 [J]. 气象科技, 2012, 40 (4): 601–605.
- [76] 郭巍, 魏鸣. 2010 年春西南酷旱的监测与机理分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26 (9): 1628–1636.

Summary of Advance on Drought Study in Southwest China

YIN Han^{1,2}, LI Yaohui^{1,2}

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province,

Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Extreme climate events such as heavy drought were increasing under the background of global climate change. The intensity and area of drought increased continually in recent years in China, and drought events began to develop from arid and semi – arid regions to humid area. There were abundant rainfall and humid climate in Southwest China, but in recent years, severe drought events lasting for several years occurred there, which caused huge damage to local social economy and attracted widespread interest. Many researchers studied about southwestern drought events, they tried to find occurrence regularity, characteristics and formation mechanism through analysis of temporal and spatial distribution of precipitation and temperature in southwest China, atmospheric circulation and weather system; some researchers studied about monitoring system for southwestern drought by using drought index and satellite remote sensing and so on. In this paper, based on investigating a large amount of related documents, we had a summarization and commentary about the recent study achievements of southwestern drought and tried to offer reference to the study on the drought of southwest and even other regions, and offer help to drought disaster prevention and reduction.

Key words: southwestern drought; advance; summary